

SCHIFFSANTRIEBE

Additive Fertigung von Duplexstahl mittels Laserstrahl

Thomas Vauderwange

Additive Fertigungsverfahren für Metalle sind seit Jahren etabliert. Die Verarbeitung von Duplexstahl im metallischen 3D-Druck stellt jedoch weiterhin eine besondere Herausforderung dar – insbesondere dann, wenn der Prozess auf einer laserbasierten Schweißenergiequelle beruht. Bei dem Unternehmen SKF Marine in Hamburg wurde dieser Ansatz erfolgreich erprobt und in die Praxis überführt.

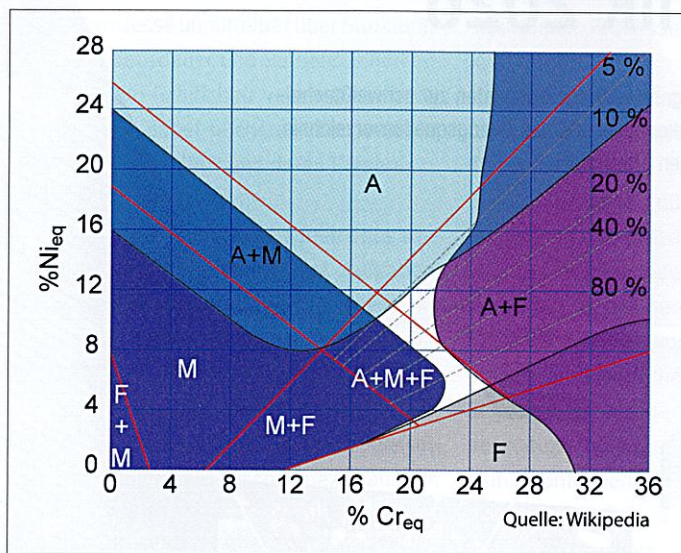


Bild 1: Das Schäffler-Diagramm zeigt die bei Raumtemperatur vorliegenden Gefügestrukturen von Stahl in Abhängigkeit der wichtigsten Legierungselemente. (© Wikipedia)

Erst wenn durch einen erhöhten Anteil an Legierungselementen die Austenitstruktur auch bei Raumtemperatur stabil bleibt, werden die besonderen Eigenschaften dieses Gefüges deutlich. Dazu zählen unter anderem eine geringere Wärmeleitfähigkeit, eine höhere Wärmekapazität, fehlende Magnetisierbarkeit sowie eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit. Die bei Raumtemperatur entstehenden Gefüge in Abhängigkeit bestimmter Legierungselemente lassen sich in der Übersicht dem Schäffler-Diagramm entnehmen (**Bild 1**).

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass für ein bei Raumtemperatur stabiles Austenitgefüge ein bestimmter Mindestanteil an Nickel erforderlich ist, der zudem vom Chromgehalt abhängt. Tatsächlich wirken jedoch nicht nur Chrom und Nickel als zentrale Einflussgrößen. Verschiedene Legierungselemente erhöhen das sogenannte Chromäquivalent beziehungsweise Nickeläquivalent und beeinflussen damit maßgeblich die Gefügeausbildung.

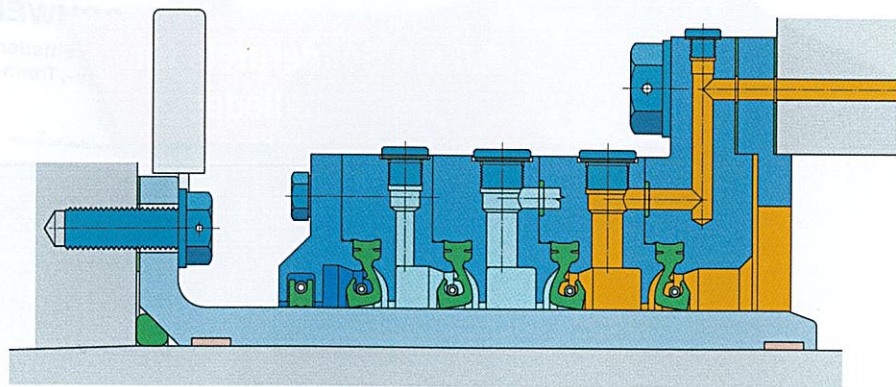


Bild 2: Schematischer Aufbau der Wellendurchführung im Querschnitt; der Liner ist hellblau dargestellt. (© SKF Marine)

Ferrit ist als α -Eisen mit kubisch-raumzentrierter Gitterstruktur bekannt und bildet die metallurgische Grundlage vieler unlegierter Baustähle. Abhängig vom Kohlenstoffgehalt tritt Ferrit häufig gemeinsam mit Perlit auf. Perlit bezeichnet dabei ein lamellares Gefüge aus Ferrit und Zementit, das bei einem Kohlenstoffgehalt von etwa 0,8 % entsteht und in metallografischen Schliffbildern typischerweise als dunkle, streifenförmige Struktur erscheint.

Wird Ferrit weiter erwärmt, erreicht man im Bereich von etwa 723 °C die sogenannte A1-Temperatur. In diesem Temperaturbereich beginnt ein Teil des Gefüges von der kubisch-raumzentrierten in eine kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur überzugehen. Diese Struktur wird als γ -Eisen beziehungsweise Austenit bezeichnet und weist gegenüber Ferrit deutlich andere Eigenschaften auf. Beim Abkühlen unterhalb

der A1-Temperatur wandelt sich Austenit im Gleichgewichtszustand jedoch wieder vollständig in die kubisch-raumzentrierte Ferritstruktur zurück, sodass dieser Vorgang im normalen Zustand meist nicht sichtbar wird.

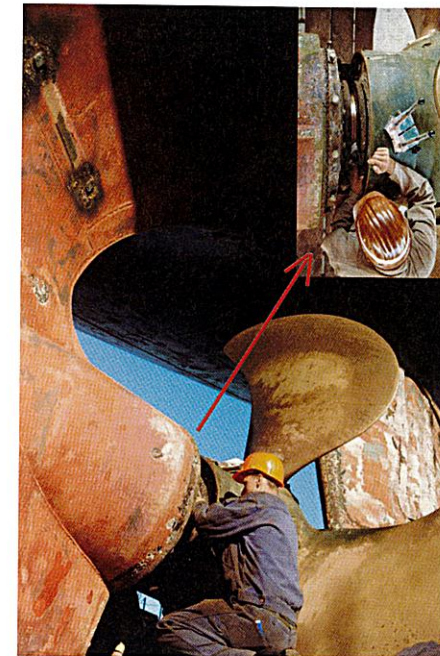


Bild 3: Im Dock wird der Liner freigelegt und überprüft, ob ein Austausch erforderlich ist. Falls ja, ist Eile geboten. (© SKF Marine)



Bild 4: Endprodukt: eine fertig bearbeitete Laufbuchse aus Duplexstahl 1.4462 (© VauQuadrat GmbH)

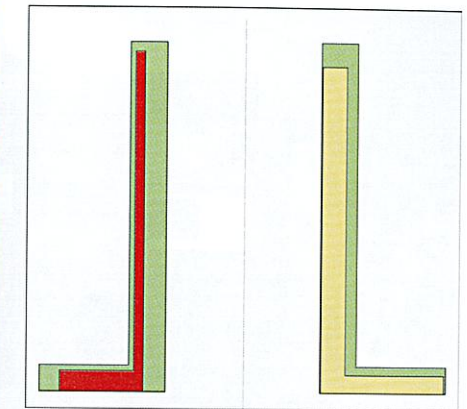


Bild 5: Der im Schleuderguss hergestellte Rohling (grün dargestellt) ist größer dimensioniert, sodass durch Abdrehen beispielsweise die rot und gelb dargestellten Geometrien daraus gefertigt werden können. (© VauQuadrat GmbH)

rechten Seite etwa mittig mit „A+F“ gekennzeichnet (**Bild 1**). Der Werkstoff 1.4462 ist ein typischer Vertreter dieser Duplexstähle.

Laufbuchsen als kritische Komponenten im Schiffsantrieb

Ein klassisches Einsatzfeld für diese Technologie findet sich im Schiffbau – und zwar über alle Größenklassen hinweg: vom kleinen Motorboot über moderne Kreuzfahrtschiffe bis hin zum großen Frachter. Die Abdichtung darf im Seewasser nicht korrodieren und muss zugleich sicherstellen, dass Meerwasser außerhalb des Systems bleibt, während Medien zum Kühlen und Schmieren der Wellenkomponenten im Schiffsinnen geführt werden.

Doch wie wird das Antriebsdrehmoment von innen nach außen übertragen? Dass hierfür eine massive Stahlwelle entsprechenden Durchmessers eingesetzt wird, liegt nahe. Die eigentliche Herausforderung besteht jedoch darin, diese durch die Schiffswand zu führen, ohne eine permanente Leckage von Seewasser zu verursachen. Ein Blick in den Katalog von SKF Marine (**Bild 2**), einem Hersteller von Wellenabdichtungen für den internationalen Markt, liefert die Antwort. Die Welle wird innerhalb eines sogenannten Stevenrohres sowie mehrerer Lager im Schiff geführt und ragt aus dem Schiffsheck heraus. Bevor der Schiffspropeller endgültig montiert wird, wird die Wellenabdichtung dazwischen installiert. Um die nicht standardisierten Wellendurchmesser an das jeweilige Abdichtungssystem anzupassen, werden zwischen Antriebswelle und

Abdichtungssystem sogenannte Laufbuchsen (englisch „Liner“) eingesetzt. Laufbuchse und Antriebswelle sind mit dem Propeller verbunden und rotieren gemeinsam.

Für die Abdichtung laufen auf der Außenfläche der Laufbuchse – je nach Abdichtungssystem – mehrere Dichtlippen. Zwischen diesen Dichtlippen befinden sich Kammern, die je nach System mit Wasser, Öl oder Luft gefüllt sind (**Bild 2**). **Bild 3** zeigt aus zwei Blickwinkeln die Situation, in der sich ein Mitarbeiter von SKF Marine im Dock von außen Zugang zum Liner verschafft.

Im Mittelpunkt dieses Beitrags stehen genau diese Laufbuchsen. Ihr Innendurchmesser ist auf die jeweilige Antriebswelle abgestimmt und variiert je nach Schiffsgröße erheblich: Er kann etwa 80 mm betragen, bei großen Schiffen jedoch auch Durchmesser von bis zu 1200 mm erreichen. Die Geometrie besteht im unteren Bereich aus einem Flansch, der sich nach oben in Form eines Rohrs fortsetzt. **Bild 4** zeigt das fertige Bauteil.

Klassische Fertigung und ihre Grenzen

Zur Herstellung eines solchen Liners gibt es mehrere Möglichkeiten. Der klassische Ansatz bestand darin, zunächst einen Rohling als Schleudergussbauteil herzustellen. Dieser weist in allen Richtungen ein gewisses Übermaß auf und wird anschließend durch Drehen auf das erforderliche Endmaß gebracht. Wären stets identische Abmessungen und sehr große

Duplexstahl als Werkstoff für korrosive Umgebungen

Mit einem Werkstoff, der bei Raumtemperatur als Austenit vorliegt – beispielsweise dem nichtrostenden Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10), im allgemeinen Sprachgebrauch oft „V2A“ genannt – lassen sich bereits viele Anwendungen realisieren. So übersteht er als Besteck problemlos die Geschirrspülmaschine und zeigt auch im Außeneinsatz in küsternen Regionen eine gute Korrosionsbeständigkeit. Allerdings verfügt dieser Werkstoff weder über eine besonders hohe Festigkeit, noch wäre er beispielsweise für den Einsatz in Seeluft oder in der aggressiven Atmosphäre eines Straßentunnels ausreichend beständig.

Sofern jedoch erhöhte Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit bestehen, etwa entsprechend der Korrosionsschutzklasse CRC IV für Stahl nach Eurocode 3 (DIN EN 1993, Anhang A), stößt ein rein austenitisches Gefüge an seine Grenzen.

Diese Eigenschaften – neben einer erhöhten Festigkeit – lassen sich beispielsweise mit Duplexstählen erreichen. Sie tragen ihren Namen, weil ihr Gefüge Ferrit und Austenit in etwa gleichen Anteilen enthält. Im Schäffler-Diagramm ist die entsprechende Legierungszone auf der



Bild 6: Der „AM Cube“ – die automatisierte Anlage, in der Laufbuchsen-Rohlinge aus Duplexstahl additiv gefertigt werden. (© VauQuadrat GmbH)

Stückzahlen gefragt, ließe sich dieses Verfahren vergleichsweise einfach standardisieren. In diesem Fall wäre die Fertigung im Wesentlichen eine Frage der Lieferkette und der Bevorratung eines einheitlichen Rohlingstyps.

Die Besonderheit von Antriebswellen und deren Lagerung besteht jedoch darin, dass es praktisch keine Standardisierung gibt – nahezu jedes Schiff weist eigene Abmessungen auf. Um dennoch wirtschaftlich fertigen zu können, wurde ein Sortiment an Rohlingen definiert, bei dem sich aus jedem Rohling mehrere unterschiedliche Endmaße herstellen lassen. **Bild 5** verdeutlicht dieses Prinzip:

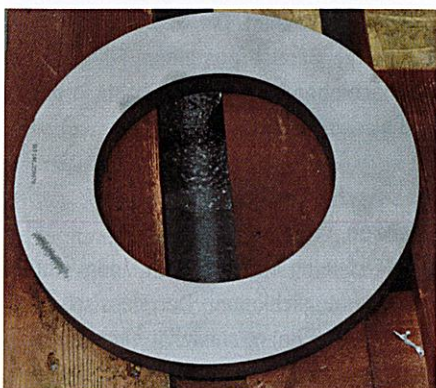


Bild 7: Einer der kleineren Substratringe aus Duplexstahl 1.4462, auf dem der zylindrische Teil der Laufbuchse lagenweise mittels Laser aufgebaut wird. (© VauQuadrat GmbH)

In einer Rohlingform (grün) können zwei verschiedene Fertigmaße (rot und gelb) realisiert werden.

Der verbleibende Nachteil dieses Kompromisses besteht darin, dass weiterhin eine erhebliche Menge an Material zerspannt werden muss. Zudem bindet die Vorhaltung verschiedener Rohlinge sowohl Lagerfläche als auch Kapital. Hinzu kommt, dass die Herstellung einer bestimmten Rohgeometrie im Schleudergussverfahren mehrere Wochen in Anspruch nimmt. Das ist insofern relevant, als sich das betreffende Schiff während einer eng getakteten Liegezeit in der Werft befindet und der Austausch der Laufbuchse die kurzfristige Verfügbarkeit des Ersatzteils voraussetzt. Eine entsprechende Lagerhaltung sowie der damit

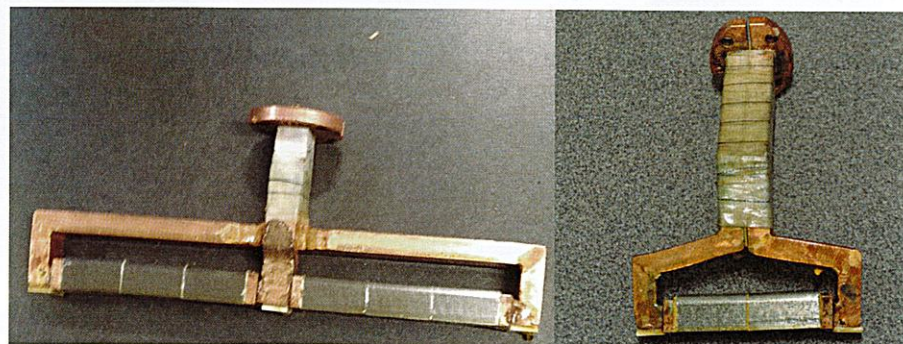


Bild 8: Die beiden eingesetzten Induktortypen: Der Gold2 (links) besitzt eine Feldkonzentratorenlänge von 2 x 90 mm, der Robbiduktor D (rechts) eine Länge von 60 mm. (© VauQuadrat GmbH)

verbundene Zerspannungsaufwand lassen sich daher bislang kaum vermeiden.

Additive Fertigung als Alternative

Mit dem Aufkommen additiver Fertigungsverfahren wurde bei SKF Marine in Hamburg nach Möglichkeiten gesucht, solche Komponenten zeit- und ressourceneffizienter herzustellen. Ziel ist es, die Lieferzeiten deutlich zu verkürzen, Laufbuchsen automatisiert und reproduzierbar zu fertigen und gleichzeitig eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen.

In Zusammenarbeit mit der Chiron Group SE in Tuttlingen wurde ein drahtbasiertes additives Verfahren mit Laser entwickelt und automatisiert (englisch: „Directed Energy Deposition – Laser Beam with Wire“, kurz DED-LB/w). Der sogenannte „AM Cube“ (**Bild 6**) umfasst einen 5-Achs-Knickarmroboter mit zusätzlichem Drehtisch. Als Energiequelle dient ein 12-kW-Scheibenlaser. Das Werkstück selbst wird auf einem zentral angeordneten Drehtisch montiert. Der Cube integriert zudem die Absaugung sowie die für den Fertigungsprozess erforderliche Messtechnik und erreicht im praktischen Betrieb eine Abschmelzleistung von etwa 6 kg/h.

Prozessentwicklung und Vorwärmstrategie

Ohne eine geeignete Wärmeleitung lässt sich das gewünschte Gefüge nicht prozesssicher erzeugen. Das gilt bereits für Lichtbogenverfahren, in besonderem Maße jedoch für den Laser als Schweißenergiequelle.

Die Anforderungen an die Anbindung zwischen Substrat und additiv aufgeschweißter Struktur sind hoch. Je nach Geometrie des

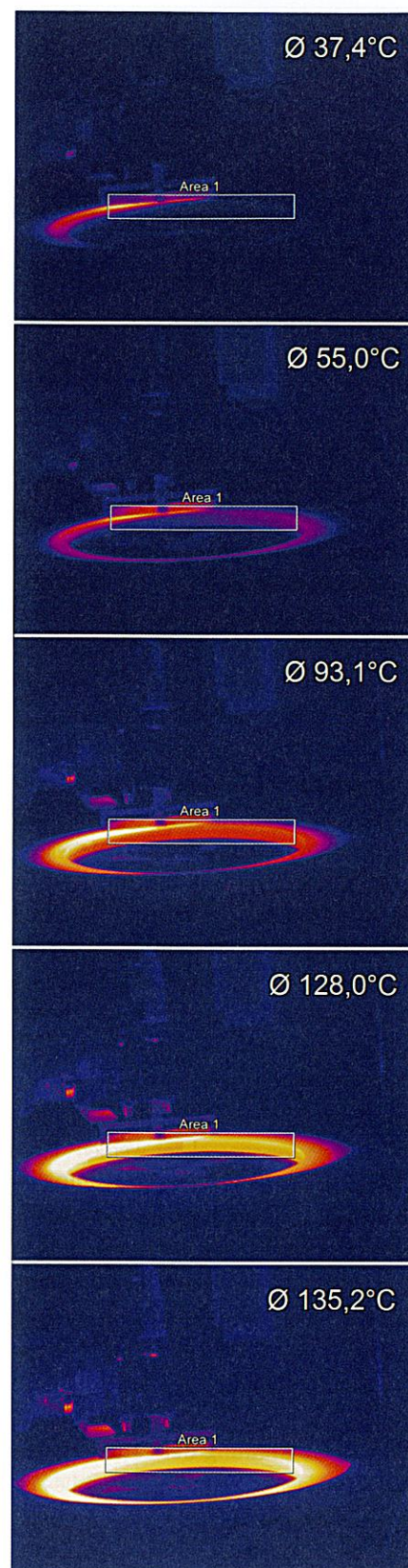


Bild 10: Die Wärmebildfolge zeigt den Anstieg der Vorwärmtemperatur. Eine vollständige Durchwärmung des Bauteils ist dabei jedoch nicht zu erkennen – sie ist für den Prozess auch nicht erforderlich. (© SKF Marine)



Bild 9: Der QR-Code führt zu einem Video, das den Vorwärmprozess zeigt. <http://bit.ly/4sLxcvS>

Substrats kann die Temperaturführung jedoch deutlich variieren. Um dennoch eine reproduzierbare und prozesssichere Anbindung zu gewährleisten, werden die Substratringe vor dem Prozess auf eine definierte Zieltemperatur vorgewärmt. Bei den vorliegenden Dickenverhältnissen wird davon ausgegangen, dass eine Vorwärmtemperatur von etwa 150 °C erforderlich ist.

Vorwärmung mittels Tiefeninduktion

Eine Umsetzung dieser Vorwärmung in der Kammer mittels Flamme wurde von vornherein ausgeschlossen. Die dabei entstehenden Emissionen wären weder für die Laseroptiken noch für die Messtechnik zuträglich. Hinzu kommt, dass eine automatisierungsgerechte Flammüberwachung sehr aufwendig wäre und sich auf diesem Weg nur mit erheblichem Zeitaufwand eine gleichmäßige Durchwärmung erreichen ließe.

Eine Möglichkeit bestünde darin, die Erwärmung separat, beispielsweise in einem Ofen, vorzunehmen. Dies würde jedoch bedeuten, das bereits aufgeheizte Bauteil bewegen zu müssen. Zudem wäre eine höhere Aufheiztemperatur erforderlich, um die unvermeidlichen Wärmeverluste durch Abstrahlung während der Handhabung und des Transports zum Drehtisch auszugleichen und dennoch die notwendige Vorwärmtemperatur sicherzustellen.

Eine Vorwärmung mittels konventioneller Induktion ist ebenfalls problematisch. Zwar lässt sich bei niedrigen Frequenzen (1 kHz und darunter) eine große Eindringtiefe erzielen, jedoch gehen damit auch entsprechend große Streufelder einher. Aufgrund der in unmittelbarer Nähe befindlichen Messtechnik – und nicht zuletzt wegen des direkt daneben positionierten Roboters für den Laser – stellt dieses Verfahren daher keine praktikable

Option dar. Bei hohen Frequenzen wären die Streufelder zwar gering, jedoch erschwert der Skineffekt die Kontrolle der Oberflächentemperaturen erheblich.

In Zusammenarbeit mit dem Hersteller VauQuadrat wurde schließlich ein Vorwärmprozess auf Basis der Tiefeninduktion entwickelt, der in die Steuerung der automatisierten Roboterzelle integriert ist.

Versuchsphase und Optimierung des Vorwärmprozesses

Entsprechende Vorwärmversuche wurden kurze Zeit später an den ringförmigen Substratbauteilen durchgeführt, auf denen anschließend die zylindrische Struktur additiv lagenweise aufgebaut wird. **Bild 7** zeigt eine der kleineren Varianten.

Die Versuche erfolgten zunächst mit manueller Platzierung des Induktors an einem Magnethalter. Als erste Erkenntnis zur Optimierung zeigte sich, dass die Ringe auf der Drehvorrichtung ab diesem Zeitpunkt auf thermisch isolierendes Material aufgelegt wurden. Während bei kleineren Ringen mit Durchmessern um 190 mm und Dicken von etwa 20 mm ein Tiefeninduktionsinverter mit 18 kW selbst bei direkt aufliegendem Werkstück noch in der Lage ist, die erforderlichen 150 °C zu erreichen, gestaltet sich dies bei Ringen mit etwa 1250 mm Durchmesser und Dicken von über 45 mm deutlich schwieriger. Ursache ist hier vor allem der hohe Wärmeabfluss in den Drehtisch.

Bei den Versuchen handelte es sich um den klassischen Ansatz, bei dem die Vorwärmung als separater, vorgeschalteter Prozess erfolgt. Eine direkt gekoppelte, dem Prozess unmittelbar vorlaufende Vorwärmung – wie sie mit Tiefeninduktion grundsätzlich ebenfalls möglich ist – wurde in diesem Fall zunächst nicht umgesetzt.

Es zeigte sich, dass sich mit dem Induktortyp Gold2, einer vergleichsweise langen Bauform, die meisten Anwendungsfälle abdecken lassen. Für besonders kleine Bauteile wurde ergänzend die Induktorform Robbiduktor D ausgewählt (**Bild 8**).



Bild 11: Kiril Schmidt, Fertigungsingenieur bei der SKF Marine GmbH in Hamburg, ist für den additiven Anlagenpark sowie die Entwicklung der zugehörigen additiven Fertigungsprozesse verantwortlich. (© VauQuadrat GmbH)

Erwärmungsmechanismen und Prozessbeobachtung

Das System V4 arbeitet mit einer Frequenz von 15,8 kHz und damit im vergleichsweise hohen Frequenzbereich. Nach Literaturangaben wäre in diesem Anwendungsfall lediglich eine Stromeindringtiefe von wenigen Zehntelmillimetern zu erwarten. Beobachtungen im Versuch zeigen jedoch, dass die effektive Erwärmungstiefe deutlich größer ausfällt. Es werden Leistungen von 15 kW und mehr eingebracht, und die vergleichsweise moderaten Oberflächentemperaturen, die über längere Zeit stabil bleiben, deuten darauf hin, dass die Wärme nicht ausschließlich über Oberflächeneintrag und anschließende Wärmeleitung in das Bauteil gelangt.

Um einen Eindruck von diesem Vorwärmprozess zu erhalten, empfiehlt sich ein Blick auf

das Video hinter dem QR-Code in **Bild 9**. Die Darstellung in **Bild 10** zeigt zudem, welche Wärmebildaufnahme der Anlagenbediener während des Prozesses auf dem Bildschirm der SPS sieht. Auffällig ist dabei, dass man nach den üblichen Vorstellungen der DIN EN ISO 13916 – und generell bei nicht primär tiefenwirksamen Erwärmungsverfahren – eine deutlich größere Vorwärmzone erwarten würde. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, dass dies in diesem Fall nicht erforderlich ist.

Integration der Induktion in die Roboterzelle

Die Besonderheit im apparativen Aufbau liegt darin, dass für die Integration in den AM Cube kein Tiefeninduktionsgerät in Kompaktbauweise mit integriertem Kühler – wie beispielsweise das VauQuadrat V4 – verwendet wurde.



Bild 12: Die Bildschirme links vom Bedienpult visualisieren sämtliche Prozessdaten und überwachen den Innenraum des Cubes sowie den Prozessbereich. (© VauQuadrat GmbH)

Stattdessen kamen einzelne Tiefeninduktionsinverter des Typs V7S im Rollkoffergehäuse zum Einsatz, die direkt in das Kühlsystem des „AM Cube“ integriert werden konnten.

Der Rollkoffer ist außerhalb der Anlagenumhausung positioniert, sodass sich im Arbeitsbereich lediglich das Schlauchpaket mit dem Induktor befindet. Der Induktor ist auf einem der zahlreichen wechselbaren Auftragsköpfe montiert, sodass auch der Vorwärmprozess vollständig automatisiert abläuft.

Von der zentralen Siemens-SPS aus werden neben dem Laser und dem Roboter auch die Tiefeninduktionsinverter angesteuert. Zum Zeitpunkt der Anlagenplanung befand sich die Profinet-Ansteuerung der VauQuadrat-Geräte noch in der Entwicklung, weshalb die Inverter über das Universalinterface RC25 mittels potenzialfreier Schaltkontakte integriert wurden.

Automatisierter Fertigungsablauf

Kiril Schmidt (**Bild 11**), MSc Maschinenbau und seit 2024 als Fertigungsingenieur bei SKF Marine tätig, erläutert den Ablauf: „Zu Beginn des Prozesses greift der Roboter zunächst einen Messtaster, um Position und Höhe des Substrats zu erfassen. Anschließend wechselt der Roboter auf den Induktor und wärmt den Substrating auf die vorgegebene Zieltemperatur vor. Je nach Substratdurchmesser dauert dieser Schritt zwischen zwei und 30 Minuten. Sämtliche Prozessparameter werden dabei grafisch dargestellt und im Sinne der Qualitätssicherung auftragsbezogen gespeichert.“

Auf den Bildschirmen links neben dem SPS-Bedienterminal werden sowohl ein Realbild als auch ein Wärmebild aus dem Inneren des Cube angezeigt (**Bild 12**).

Additive Herstellung der Laufbuchsen

Die entscheidende Frage lautet: Welches Ergebnis liefert der anschließende Schweißprozess, wenn der Laser Lage für Lage Zusatzdraht aufschmilzt?

Kiril Schmidt erklärt: „Über die Jahre konnten wir umfangreiche Erfahrungen in der additiven Herstellung von Duplexwerkstoffen sammeln und die Anlagensysteme kontinuierlich darauf weiterentwickeln. Nach dem



Bild 13: Blick auf den lagenweisen Aufbau der Schweißlagen mittels Laser (© SKF Marine)

Schweißprozess liegt ein Werkstoff des Typs 1.4462 Duplexstahl vor, der sowohl die mechanisch-technologischen Kennwerte und die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gemäß Norm erfüllt als auch unsere darüber hinausgehenden, hausinternen Qualitätsanforderungen.“ Das schrittweise Entstehen der einzelnen Lagen ist in der Bildfolge in **Bild 13** dargestellt.

Nach einer Schweißzeit von zwei bis zu 70 Stunden – abhängig von der Bauteilgröße – endet der Prozess. Die vollautomatisierten Abläufe laufen dabei auch über Nacht. Die additiv hergestellten Rohkomponenten werden anschließend in einer Abkühlstation zwischengelagert, bevor sie in der benachbarten Zerspanungsabteilung weiterbearbeitet und auf die Sollmaße gedreht werden.

Metallurgische Qualität der Bauteile

Wird ein derart fertig bearbeitetes Bauteil aufgesägt, zeigt sich das gewünschte Ergebnis: ein vollständiges, maßhaltiges Bauteil ohne nennenswerte Fehlstellen oder Poren im Inneren (**Bild 14**). **Bild 15** vermittelt einen Eindruck davon, wie sich dies in der Praxis darstellt.

Die im Zuge der Prozessentwicklung durchgeführten metallurgischen Untersuchungen bestätigen dieses Ergebnis. Sie zeigen

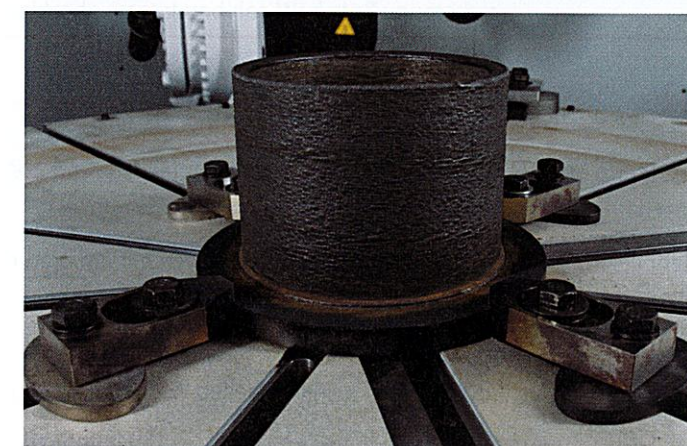


Bild 14: Fertig geschweißte Rohkomponente (© VauQuadrat GmbH)



Bild 15: Nach dem Abdrehen der Außenseiten und dem Blick in den Querschnitt zeigt sich die hohe Qualität des entstandenen Schweißguts. Lunker oder Risse sind nicht erkennbar. (© VauQuadrat GmbH)

insbesondere, dass mit dem eingesetzten Wärmeregime ein prozessstabiles Verfahren erreicht wurde, bei dem sowohl das Ferrit-Austenit-Verhältnis als auch die mechanisch-technologischen Kennwerte zuverlässig und reproduzierbar eingestellt werden können. ■



Dipl.-Ing. Thomas Vauderwange
MBA SFI/IWE
VauQuadrat GmbH
thomas@vauderwange.de